

文章编号: 2095-4980(2015)04-0562-07

太赫兹复合材料无损检测技术及其应用

张紫茵, 邢砾云, 张 瑾, 马宇婷, 常天英, 崔洪亮*

(吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130000)

摘 要: 随着材料科学的迅速发展, 复合材料、高分子材料在航空航天领域得到了广泛应用。由于这些材料的特殊性质, 现有的较为成熟的探伤手段都不能有效对其进行检测。但对于太赫兹波来说, 许多非极性、非金属材料都是半透明, 可以有效探测到这些材料的内部缺陷。本文简要介绍了太赫兹的性质及太赫兹无损探伤原理, 并以航天领域应用较广的几种复合材料为例对太赫兹无损检测应用做了简介。

关键词: 太赫兹波; 无损检测; 内部缺陷; 复合材料; 应用

中图分类号: TN29

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201504.0562

Terahertz composite nondestructive testing technology and application

ZHANG Ziyn, XING Liyun, ZHANG Jin, MA Yuting, CHANG Tianying, CUI Hongliang*

(College of Instrumentation Science and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130000, China)

Abstract: With the rapid development of materials science, composite materials and polymer materials are applied in the aerospace area extensively. Nevertheless, existing mature methods of detection can not be used effectively due to the special nature of these materials. But many non-polar, non-metallic materials are transparent for terahertz wave, of which the internal defects can be effectively detected. In this paper, the properties of terahertz and the principles of terahertz nondestructive detection are briefly introduced. Several kinds of composite material widely used in the aerospace field are taken as examples for terahertz nondestructive testing applications.

Key words: terahertz wave; nondestructive testing; internal defect; composite materials; application

太赫兹(Terahertz)波, 是指波长范围为 3 mm~30 μm , 频率范围为 100 GHz~10 THz 的一类电磁波, 又称 T 射线(T-rays), 在某些领域也被称为远红外辐射或毫米波、亚毫米波^[1]。虽然大自然中太赫兹辐射源随处可见, 但由于缺少有效的源发射太赫兹波, 并且对太赫兹波的探测也缺乏有效的手段和设备, 致使在很长一段时间内人们对太赫兹波的了解并不深入。因此, 太赫兹波曾一度成为电磁波谱中不为人所知的“空白”^[2-4]。直至 20 世纪 80 年代, 超快激光技术的蓬勃发展为太赫兹波的产生带来了可能, 太赫兹科学开始引起人们的广泛关注^[1]。

无损检测技术具有无损性、即时性等特点, 在航空航天、汽车工业、化工等领域得到了广泛应用。目前应用较广的无损检测手段包括超声检测、射线检测、磁粉检测、渗透检测、涡流检测 5 种^[5]。可根据使用场合、材料等条件的不同, 选择适当的探伤方式进行检测。上述 5 种检测方法各有其特点和优势, 但不能够完全适用于任何场合。太赫兹无损检测作为一种新兴的无损检测手段, 可以与传统的检测方法相互弥补, 为复合材料的无损检测提供更加全面的技术支持。

随着近年来材料科学的迅速发展, 越来越多的高新材料被广泛应用。而许多领域对材料的内部规整性有着极高的要求, 这就要求在改良制备工艺以提高材料整体质量的同时, 寻找一种有效的手段对材料进行非破坏性探伤, 从而确保材料在使用过程中的可靠性。对于磁性材料、高分子复合材料以及泡沫、陶瓷、塑料等应用广泛的材料, 可见光、红外线甚至是超声波都不能透过。而对于通常的射线检测方法而言, 无论是上述材料本身, 还是材料中可能出现的缺陷, 如孔洞、错位、裂缝等, 都是几近透明的, 因此难以对材料内部的缺陷清晰成像, 这就使得对这类材料的无损检测受到限制^[6]。

收稿日期: 2015-02-05; 修回日期: 2015-03-25

基金项目: 海洋局基金资助项目(201405026-01); “十二五”基金资助项目(2012BAK04B03)

*通信作者: 崔洪亮 email:hcui@jlu.edu.cn

太赫兹波对大部分非金属、非极性材料具有较好的穿透能力,可利用太赫兹波结合成像技术,对这类材料的内部缺陷进行无损探伤。太赫兹波的光子能量较低,频率为 1 THz 的太赫兹脉冲光子能量只有 4 meV,相比 X 射线(keV)的光子能量而言,不会使被检测对象产生光致电离,具有更高的安全性。此外太赫兹波对水十分敏感,要求被测物质干燥,但也可利用水对太赫兹波的吸收特性检测某些物质水分含量。

1 太赫兹无损检测原理

基于太赫兹波谱的无损探伤技术,与其他传统的检测手段相比,具有许多独特的优点。在非金属、非极性材料的检测方面,太赫兹波不仅可以透过不透明材料探测材料内部的杂质、位错、微裂纹、纤维分层、纤维与基体界面开裂、纤维卷曲、富胶或贫胶、孔洞、脱胶以及氧化等缺陷,还可代替红外应用在绝热材料和热敏感材料的检测中。并且由于太赫兹波的低能性,不会对被检材料造成结构上的破坏,也不会产生对人体有害的辐射^[7]。超声波检测在探测时必须与被检测对象接触,且在某些材料中,声波衰减率很大,利用超声波对此类材料进行探伤十分困难,而太赫兹波无损检测方法对这些材料仍然可行,且可在不接触被测材料的情况下对其进行无损探伤^[8],因此可将太赫兹无损检测作为一种互补手段,针对复合材料、高分子材料进行检测。

太赫兹无损检测技术是在太赫兹波谱技术的基础上建立起来的。太赫兹波谱技术主要分为太赫兹时域波谱、太赫兹时间分辨波谱和太赫兹发射波谱 3 种,本文将以太赫兹时域波谱系统(Terahertz-Time Domain Spectra, THz-TDS)为例概述其检测原理。THz-TDS 技术是一种可以同时获得太赫兹脉冲的相位和振幅的相干检测技术,经典光路包括透射型光路、反射型光路、差异型光路、啁啾展宽型光路 4 种。基于 THz-TDS 系统的扫描成像可分为透射型扫描和反射型扫描 2 种方式,下面简要介绍其成像原理。

THz-TDS 扫描成像系统具体光路如图 1 所示。由脉冲激光器发出的超快激光脉冲经过偏光分束镜被分为 2 束,一束作为泵浦光,入射到太赫兹发射器(如光电导天线、半导体晶片、非线性晶体等)上,用于产生太赫兹脉冲,此脉冲经抛物面镜聚焦后入射到待测样品上。分束镜分出的另一束太赫兹脉冲将作为探测光,它与从样品中透射出的载有样品信息的太赫兹电磁脉冲共线经过太赫兹探测器(如 GaAs 光电导开关或电光晶体)。调整时间延迟装置,测量不同探测光到达时间下太赫兹电场强度的变化量,对其进行傅里叶变换,获得频域上幅度和相位的变化量;最后,信号经电流前置放大器、数字信号处理器输入计算机,对采集到的数字信号进行图像处理,得到被测样品在该点处的缺陷图像。在 x - y 移动台上移动样品,使太赫兹脉冲通过被测样品的不同点,对其进行逐点扫描,记录下该样品不同位置的透射谱信息,就可以获得整个样品的图像,从而测得样品缺陷的整体存在情况。

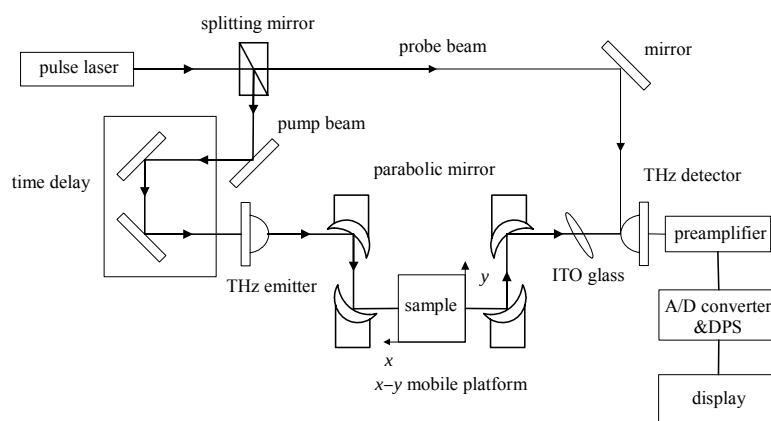


Fig.1 Schematic diagram of THz-TDS scanning imaging system

图 1 THz-TDS 扫描成像系统原理图

反射型系统的基本原理与上述透射型相同,试验装置也基本相同,不同的是从物体反射回来的波被用来作为成像信息。

太赫兹无损检测主要是利用了非极性、非金属材料对太赫兹波的半透明性。当太赫兹波入射到被测样品时,均匀的被测材料将会吸收一小部分太赫兹辐射,绝大部分的太赫兹波将透过样品并被探测器接收。但如果被测复合材料样品内部或表面存在缺陷,如杂质、位错、微裂纹、纤维分层、纤维与基体界面开裂、纤维卷曲、富胶或贫胶、孔洞、脱胶以及氧化等,太赫兹波在缺陷部位将会发生散射,能量将会大量损耗,因此在成像时,将会与材料连续、均匀部分的成像结果产生明显的差别。通过对整个样品进行扫描成像,经图像处理,试验样品的缺陷情况将会较为清晰地反映在成像结果上。

2 太赫兹无损检测应用

近年来, 复合材料领域迅猛发展, 越来越多的复合材料被应用在航空航天、船舶、汽车以及核工业等高新领域, 利用太赫兹波对复合材料进行无损检测的热潮也应运而生。所谓复合材料, 可以是金属材料、无机材料、高分子材料中任意 2 种或 2 种以上的复合, 通过物理或化学作用, 将会形成并得到兼具各材料优点的新材料。但将组成、结构相差甚远的材料复合到一起时, 它们的结合不可能达到完美, 并且每一种基材自身也可能存在一定的缺陷, 而这些缺陷将会成为材料使用过程中的薄弱环节, 也就是说, 材料很可能在实际使用条件未达理论上限时就从这些薄弱环节开始发生破坏。为保证材料在后期使用过程中的可靠性, 在复合材料的生产、加工、使用过程中对其进行缺陷检测十分必要。利用太赫兹无损检测技术, 可以在上述各个环节有效检测复合材料可能产生的各种缺陷, 而关于太赫兹检测技术工业化及其检测设备小型化的研究已成为当下无损检测领域研究的又一热点。

太赫兹波对高分子材料的特殊性质, 使得太赫兹无损检测技术可以应用在高分子材料、复合材料内部及表面缺陷的检测中。国内外对太赫兹无损检测技术在复合材料检测方面已有成功案例, 但总体来讲, 太赫兹无损检测技术刚刚起步, 许多难关还有待攻克。

下面以喷涂泡沫绝缘材料(Sprayed-On Foam Insulation, SOFI)聚氨酯泡沫、聚甲基丙烯酸酯亚胺(Polymethacrylimide, PMI)泡沫、碳纤维/环氧树脂复合材料为实例简述太赫兹无损探伤在复合材料无损检测方面的应用。

2.1 航天飞机 SOFI 泡沫的太赫兹无损检测

2003 年 2 月 1 日美国哥伦比亚号航天飞机在完成航行任务返回地球的过程中发生爆炸, 机上 7 名宇航员全部罹难。美国国家航空和航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的专家经调查初步判断, 事故原因为哥伦比亚号所携带的外挂式燃料箱的一块 SOFI 绝热泡沫板脱落撞击到机翼, 导致飞机外壳受损。该绝热泡沫是将聚氨酯喷涂在铝制底板上, 然后发泡成型为高强度的绝热层, 在喷涂及发泡的过程中, 可能会出现空洞和脱胶现象, 而这很有可能正是哥伦比亚号航天飞机失事的根本原因。利用太赫兹无损探伤手段对 SOFI 泡沫进行无损探伤, 可以有效地检测泡沫成型过程中及成型后材料的内部以及与底板接触面的缺陷情况, 从而避免缺陷的产生或寻找有效的解决办法。

为了确保今后航天飞机的安全发射, NASA 联合外挂式燃料箱生产厂家做了一系列研究, 他们人为地在 SOFI 泡沫样品中设置了大小为 6.36 mm~50.8 mm、埋藏深度为 6.36 mm~228.6 mm 的缺陷, 这些缺陷在铝制底板上、纵桁和凸缘的边缘地带或底端均有分布。研究人员从顶部和侧面将太赫兹波脉冲入射到样品内, 并记录其反射波, 成功探测到 57 个缺陷中的 49 个^[9]。

伦斯勒理工学院太赫兹研究中心的谢旭等, 在一块 SOFI 绝热泡沫中人工设置了 8 个在实际生产制造中可能出现的缺陷, 并利用时域扫描(TDS)的方法对样品进行了试验。实验所用的超快激光脉冲中心波长为 800 nm, 脉宽 130 fs。实验过程中激光脉冲被分为 2 束, 一束作为抽运光束用来产生太赫兹脉冲, 另一束作为探测光。太赫兹脉冲照射到样品上时会穿透 SOFI 泡沫, 被铝合金底板反射后第二次穿过泡沫层, 这时 2 束脉冲同时被聚焦到探测晶体上, 利用平衡探测与锁相放大相结合的方法进行测量, 在时域上平移抽运光束即可得到试验样品在该点的信息。在 x - y 平面上移动样品以对样品进行二维扫描, 继而得到整个样品的信息。处理得到的数据, 可以得到 SOFI 泡沫内部的缺陷图像。

图 2 所示的是试验过程中使用的成像装置和 SOFI 泡沫样品。泡沫样品的形貌如图 3 所示, 对其进行成像, 可在成像结果上清晰呈现出泡沫样品的外形特征, 并且, 其内部情况也能够被有效检测。图 4 即为 SOFI 泡沫样品的太赫兹成像结果。试验结果证明, 太赫兹波可以有效对 SOFI 泡沫进行成像, 其表面特征可以清晰地反映在图像当中, 这为将基于太赫兹成像技术的太赫兹无损检测应用于泡沫的无损检测中提供了可能。

太赫兹无损探伤技术在 SOFI 绝热泡沫内部缺陷检测中的成功应用, 充分说明了基于太赫兹波谱的复合材料无损探伤技术是可行并有无限发展前景的, 也正因为这一成功的应用案例, 使得 NASA 认定太赫兹无损探伤技术为将来应用到航空航天无损探测领域的四大技术之一。

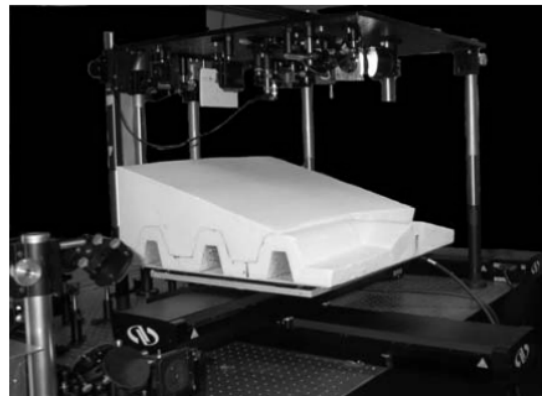


Fig.2 THz wave imaging device and SOFI foam samples
图 2 太赫兹波成像装置和 SOFI 泡沫样品

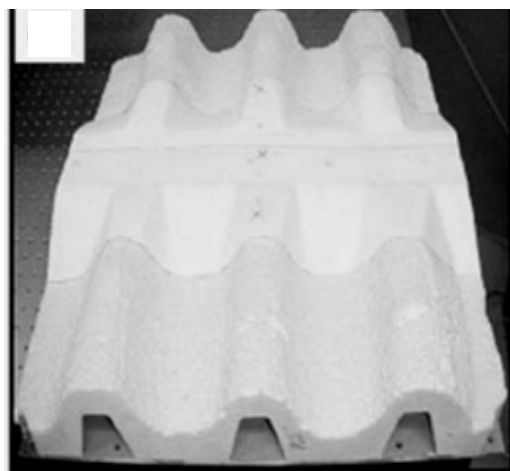


Fig.3 SOFI foam samples
图 3 SOFI 泡沫样品

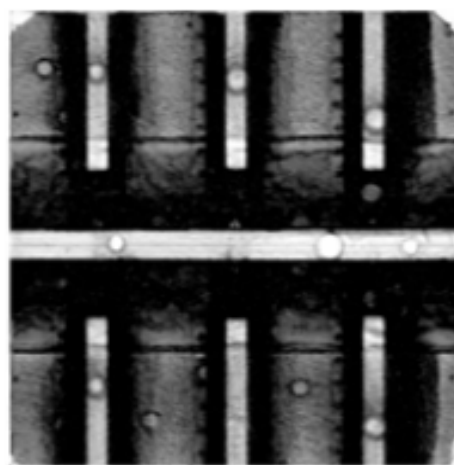


Fig.4 Imaging effect of SOFI foam samples
图 4 SOFI 泡沫样品成像效果

2.2 PMI 泡沫的太赫兹无损检测

除聚氨酯泡沫外，在航天航空领域具有很高应用价值的还有 PMI 泡沫。PMI 泡沫为 100% 闭孔泡沫材料，常应用于运载火箭整流罩及壳体、机翼的填充层等，也曾被应用在日本新干线的火车头，通用、西门子等公司的医疗床板，Vestas 的风力发电机叶片当中^[10]。

图 5 所示的是用于发泡成 PMI 泡沫成品的聚甲基丙烯酸酯亚胺预聚体，在发泡剂和高温的发泡条件下可制备成如图 6 所示的大尺寸 PMI 泡沫材料。在制备的过程中可能出现空洞、夹层、杂质等现象，这与聚氨酯泡沫十分类似。此外由于 PMI 泡沫为绝缘体，极易产生静电，从而导致胶层与泡沫结合不牢固，在使用过程中很有可能造成脱胶，并最终导致严重后果。可以利用太赫兹波对其内部缺陷进行检测，其探伤原理和设备也可根据聚氨酯泡沫进行改进。



Fig.5 Polymer board for the preparation of PMI foam
图 5 制备 PMI 泡沫的可发性共聚物板



Fig.6 Large size PMI foam
图 6 大尺寸 PMI 泡沫

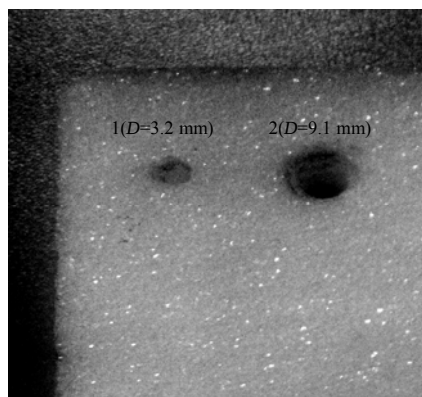


Fig.7 PMI foam sample
图 7 PMI 泡沫样品

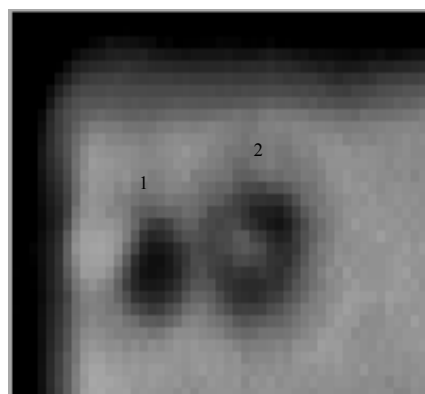


Fig.8 Defect detection effect of PMI foam sample
图 8 PMI 泡沫样品缺陷检测效果图

为探究太赫兹无损检测方法对 PMI 泡沫的可行性,本文在一块厚度为 35 mm 的 PMI 泡沫表面上预置了 2 个孔洞缺陷,如图 7 所示,利用 THz-TDS 系统对该样品进行缺陷检测,分辨力为 1 mm,其成像结果如图 8 所示。成像结果表明,利用太赫兹波在缺陷处发生散射这一原理对 PMI 泡沫进行缺陷检测的方法,能够有效检测到 PMI 泡沫中存在的孔洞缺陷,并且缺陷的位置和大体形貌可以较为清晰地体现在成像效果图当中。

目前,国内对 PMI 泡沫的应用才刚刚起步,这也就意味着利用太赫兹对 PMI 泡沫进行无损探伤的技术也将随着 PMI 的兴起得到更加广阔的应用空间和市场前景。

2.3 碳纤维复合材料的太赫兹无损检测

纤维复合材料具有可观的比强度,已被广泛应用于航空、航海和汽车制造等行业。碳纤维复合材料作为纤维复合材料的典型代表,在飞行器制造、汽车以及体育用品等领域的应用最为广泛。它是以碳纤维作为骨架,以树脂作为填充材料制成的,具有质轻、高强度、高模量的特点。

碳纤维/树脂基复合材料的破坏形式主要包括基体断裂、纤维断裂、纤维脱粘、纤维拔出、裂纹扩展与偏转,其破坏机制往往是以上 5 种基本破坏形式的组合和综合体现。纤维作为增强体加入到树脂基体中时,其断裂强度要远高于基体数值的断裂强度,因此纤维/树脂基复合材料最理想的破坏形式是纤维断裂,当以这种形式使材料发生破坏时,材料的断裂强度最高,能够使材料的力学性能发挥到最好。如果基体树脂中存在微裂纹,在纤维/树脂复合体系受到外应力作用时,微裂纹将发生扩展,随后将会发生基体断裂、纤维脱粘以及纤维拔出。为了保证碳纤维/环氧树脂复合材料具有较好的力学性能,有必要对其进行缺陷检测。

除前文提到过的几种缺陷形式会使碳纤维复合材料的使用性能降低外,当使用温度超过 200 ℃ 时,碳纤维极易发生破坏。图 9 是利用 TDS 系统对经过表面灼烧处理的碳纤维/环氧树脂复合材料反射模式成像结果,其分辨力为 1 mm。实验表明,太赫兹能够对碳纤维复合材料表面灼烧缺陷进行有效检测。

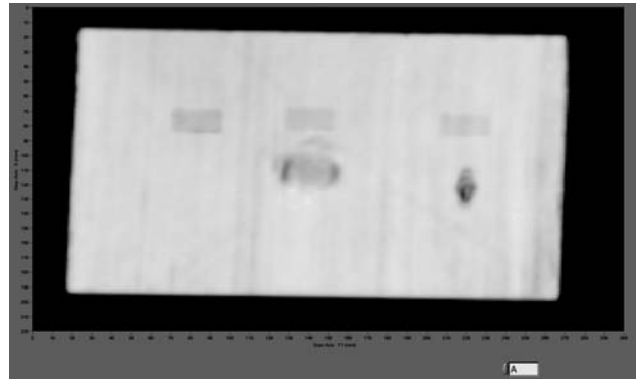


Fig.9 TDS reflected imaging result of carbon fiber/epoxy resin composite material surface ablation

图 9 碳纤维/环氧树脂复合材料表面灼烧样品 TDS 反射成像结果

施长城等^[11]应用太赫兹时域光谱技术对碳纤维增强复合材料的内部缺陷进行了检测,并成功获得了其透射光谱图像。实验结果显示,太赫兹透射成像技术可以有效检测到碳纤维复合材料中的缺陷。但由于碳纤维的排布会导致复合材料各方面性质的各向异性,因此太赫兹脉冲透射碳纤维被测样品的能力与纤维排布方向有很大关系。通常碳纤维会更多地吸收和反射一部分太赫兹信号,导致透过样品的脉冲强度较弱,利用透射成像进行探测的难度也相应增加。寻找新的太赫兹信号与图像处理方法能够有效提高透射成像的空间分辨力,为开发更加高效可靠的太赫兹复合材料无损检测技术提供技术支持。

2.4 其他材料的太赫兹无损检测

2012 年 Roth^[12]等利用计算机辅助太赫兹断层扫描技术对体积为 0.028 3 m³ 的航天飞机外挂燃料箱保护系统绝热泡沫材料进行无损检测,结果表明太赫兹计算机断层扫描技术对 10 mm~50 mm 的空隙以及撞击破坏缺陷检测效果良好。但是由于泡沫材料的微气泡结构尺寸可能与太赫兹波长在同一数量级,容易产生强烈的散射效应,影响太赫兹脉冲的传播,这将给检测理论研究带来一定的困难。2010 年,Quast^[13]运用 SynView 公司生产的连续太赫兹成像系统对泡沫进行成像,实验证明利用三维电场太赫兹成像技术在 230 THz~320 THz 频率下可以检测出预置的人工缺陷。

2010 年,Jördens^[14]等利用 THz-TDS 技术在 0.1 THz~1 THz 的频率范围内对玻璃纤维走向以及纤维含量进行了测量与分析,用 Polder 与 Van Santen 建立的方法^[15]对添加剂含量、最佳纤维取向及其百分比进行了推算,推算结果与商业软件得出的结果十分吻合。2012 年,Nezadal^[16]等在 220 GHz~325 GHz 的低太赫兹频段对玻璃纤维增强塑料进行综合孔径雷达成像实验分析,检测大小不同、深度不同的人为预置缺陷,能检测到的最小缺陷直径为 0.8 mm。2012 及 2013 年,Im^[17-18]等对碳纤维/热塑性聚苯硫的复合材料板进行了太赫兹透射光谱与反射光谱的检测实验,发现碳纤维复合材料的导电性与增强纤维的单向排列有关。

太赫兹探伤技术不仅可以应用在泡沫结构和纤维增强复合材料的缺陷检测上,而且可以应用在其他关键材料

和结构的检测中。2011年,Owens^[19]等利用太赫兹反射成像技术对陶瓷复合材料进行无损检测(分辨力小于1 mm),他们的实验证明该项技术能够解释材料因机械和热应变而导致太赫兹图像变化。2013年,Trafela^[20]等运用THz-TDS技术对250张16世纪的纸张进行了波谱采集,并将采集结果进行数学建模,运用偏最小二乘法对木素含量、抗拉强度和灰分含量进行了建模,他们发现,所建模型对灰分含量预测效果最好,校正集的决定系数为0.87,预测集的决定系数为0.82,这项研究表明了太赫兹波谱技术在大分子物质定量分析领域的潜力,也可将该项技术应用于古物的无损检测。

3 结束语

近年来,美国等发达国家在太赫兹无损检测领域投入了大量的人力、财力,以发展太赫兹技术在复合材料无损检测方面的应用。国内也顺应前沿科技的潮流,兴起了太赫兹无损检测的热潮。总体来讲,利用高分子材料、复合材料在太赫兹波段的半透明性,可以检测到其表面以及内部缺陷(如杂质、位错、分层、孔洞、脱胶、氧化等)的存在。当太赫兹波入射到缺陷处时将会发生不同程度的散射,能量将被消耗,因此在成像效果图上,将会呈现出缺陷的大致形貌,但目前的成像手段还不足以检测到微小尺寸缺陷。改进成像算法,提高成像分辨力将会有效提高探测精确度。国内已有成功利用太赫兹波对一些复合材料、高分子材料进行无损检测的先例,但我国的太赫兹无损探伤技术才刚起步,不仅难以实现快速成像,且缺少方便快捷的硬件设施,使得这一技术的实际应用大大受限。无论是理论研究还是技术改进,都有很长的一段路要走。但总体来讲,太赫兹无损检测技术拥有其独特的优点,随着复合材料在航空航天、汽车制造业、电子以及体育用品等产业的广泛应用,必将开拓更加宽广的市场环境,作为一项新兴的探测技术,也必将受到更多的重视,在不久的将来造福于人类。

参考文献:

- [1] 许景周,张希成. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京:北京大学出版社,2007. (XU Jingzhou,ZHANG Xicheng. Terahertz Technology and Application[M]. Beijing,China:Peking University Press, 2007.)
- [2] Sirtori C. Bridge for the terahertz gap[J]. Nature, 2002,417(6885):132-133.
- [3] Won R. Bridging the terahertz gap[J]. Nature Photonics, 2010,4(10):673-674.
- [4] Mantsch H H,Naumann D. Terahertz spectroscopy: the renaissance of far infrared spectroscopy[J]. Journal of Molecular Structure, 2010,964(1):1-4.
- [5] 夏纪真. 无损检测导论[M]. 广州:中山大学出版社,2010. (XIA Jizhen. Nondestructive Testing Introduction[M]. Guangzhou, China:Zhongshan University Press, 2010.)
- [6] 杨振刚,赵毕强,刘劲松,等. 太赫兹无损检测的研究[J]. 物理, 2013,42(10):708-711. (YANG Zhengang,ZHAO Biqiang, LIU Jinsong,et al. Nondestructive inspection with terahertz waves[J]. Physics, 2013,42(10):708-711.)
- [7] Adrian Dobroiu,Chiko Otani,Kodo Kawase. Terahertz-wave sources and imaging applications[J]. Meas. Sci. Technol, 2006, 17(11):161-174.
- [8] Dodson C,Spicer J,Fitchm,et al. Propagation of terahertz radiation in porous polymer and ceramic materials[C]// Review of Progress in Quantitative NDE. Golden,Colorado,USA:[s.n.], 2004:562-569.
- [9] 沈京玲,张存林. 太赫兹波无损检测新技术及其应用[J]. 无损检测, 2005,27(3):146-147. (SHEN Jingling,ZHANG Cunlin. Terahertz wave nondestructive testing technology and application[J]. Nondestructive Testing, 2005,27(3):146-147.
- [10] 唐妹红,居建国. PMI高性能泡沫夹层材料在航天产品中的应用研究[C]// 第十五届全国复合材料学术会议论文集(上册). 哈尔滨:[s.n.], 2008:434-436. (TANG Meihong,JU Jianguo. The application research of PMI foam in sapceflight[C]// The 15th national conference on composite materials academic(part I). Haerbin,China:[s.n.], 2008:434-436.)
- [11] 施长城,李薇,常天英,等. 纤维增强复合材料太赫兹无损检测研究[C]// 第二届全国太赫兹科学技术与应用学术交流会论文集(下册). 上海:[s.n.], 2014:612-616. (SHI Changcheng,LI Wei,CHANG Tianying,et al. Fiber reinforced composites terahertz nondestructive testing research[C]// The academic exchanges corpus in the second quarter national conference on terahertz science and technology and application(part II). Shanghai,China:[s.n.], 2014:612-616.)
- [12] Roth D J,Reyes-Rodriguez S,Zimdars D A,et al. Terahertz computed tomography of NASA thermal protection system materials[C]// AIP Conference Proceedings. Burlington,VT,USA:[s.n.], 2012:566-572.
- [13] Quast H,Keil A,Löffler T. Investigation of foam and glass fiber structures used in aerospace applications by all-electronic 3D terahertz imaging[C]// 2011 36th International Conference on Infrared,Millimeter and Terahertz Waves(IRMMW-THz). Houston,Texas,USA:[s.n.], 2011:1-2.

- [14] Jördens C, Scheller M, Wietzke S, et al. Terahertz spectroscopy to study the orientation of glass fibres in reinforced plastics[J]. Composites Science and Technology, 2010, 70(3):472–477.
- [15] Polder D, Van Santen J H. The effective permeability of mixtures of solids[J]. Physics, 1946, 2(5):257–271.
- [16] Nezadal M, Schur J, Schmidt L P. Non-destructive testing of glass fibre reinforced plastics with a synthetic aperture radar in the lower THz region[C]// 2012 37th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves(IRMMW-THz). Wollongong, Australia:[s.n.], 2012:1–2.
- [17] Im K H, Hsu D K, Chiou C P, et al. Influence of terahertz waves on the fiber direction of CFRP composite laminates[C]// AIP Conference Proceedings. Denver, Colorado, USA:[s.n.], 2013:604–611.
- [18] Im K H, Hsu D K, Chiou C P, et al. Terahertz radiation study on FRP composite solid laminates[C]// AIP Conference Proceedings. Burlington, VT, USA:[s.n.], 2012, 1430:1192–1199.
- [19] Owens L, Bischoff M, Cooney A, et al. Characterization of ceramic composite materials using terahertz reflection imaging technique[C]// 2011 36th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves(IRMMW-THz). Houston, Texas, USA:[s.n.], 2011:1–2.
- [20] Trafela T, Mizuno M, Fukunaga K, et al. Quantitative characterisation of historic paper using THz spectroscopy and multivariate data analysis[J]. Applied Physics A, 2013, 111(1):1–8.

作者简介:



张紫茵(1991–), 女, 辽宁省阜新市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹复合材料无损检测技术.email:ziyin_zhang@126.com.

马宇婷(1992–), 女, 吉林省珲春市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹生物光谱检测技术.

常天英(1981–), 女, 山东省烟台市人, 副教授, 主要研究方向为光纤传感、太赫兹及纳米光学.

邢砾云(1975–), 女, 吉林省吉林市人, 讲师, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹复合材料无损探伤成像技术、表面等离子共振技术研究、信息处理技术、振动控制.

张 瑾(1987–), 女, 江西省新余市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹复合材料无损检测技术.

崔洪亮(1956–), 男, 吉林省吉林市人, “千人计划”特聘教授, 博士生导师, 主要从事光纤传感器研制、THz 科学技术及应用的研究、纳米光学和纳米电子学.email:hcui@jlu.edu.cn.